

智慧水利技术在灌区工程运维管理中的应用实践

宁银军¹ 童燃燃²

1.湖北瑞洪工程管理有限公司, 湖北 荆门 448000

2.竹溪县水利和湖泊局, 湖北 十堰 442300

[摘要]灌区工程运维管理质量是保障粮食安全、水资源利用效能的关键基础设施,如运维管理存在问题,将会影响工程的稳定运行。结合传统运维管理模式来看,存在感知手段、数据融合、决策支持等方面问题,无法满足智能化管理需求。因此,本文将主要研究智慧水利技术在灌区工程运维管理中的应用实践策略,包括构建智能化感知全面监测体系、架构数字孪生底座实现数字融合、智能分析与辅助决策、搭建智慧运维管理平台业务系统,旨在提升灌区工程运维管理灵敏度、科学性、协同性,促进灌区工程获得现代化改造。

[关键词]智慧水利技术;灌区工程;运维管理;应用实践

DOI: 10.64635/ja.2026.1311

中图分类号: TV698

文献标识码: A

Application Practice of Smart Water Conservancy Technology in the Operation and Maintenance Management of Irrigation District Projects

Ning Yinjun¹, Tong Ranran²

1. Hubei Ruihong Engineering Management Co., Ltd., Jingmen, Hubei 448000, China

2. Zhuxi County Water Conservancy and Lakes Bureau, Shiyan, Hubei 442300, China

Abstract: The quality of operation and maintenance management of irrigation district projects is a key infrastructure foundation for ensuring food security and improving the efficiency of water resource utilization. Problems in operation and maintenance management may affect the stable operation of such projects. From the perspective of the traditional operation and maintenance management model, there are problems in perception methods, data integration, decision support, and other aspects, making it difficult to meet the needs of intelligent management. Therefore, this paper mainly studies the application practice strategies of smart water conservancy technology in the operation and maintenance management of irrigation district projects, including the construction of an intelligent perception and comprehensive monitoring system, the establishment of a digital twin foundation for digital integration, intelligent analysis and assisted decision-making, and the development of a business system for a smart operation and maintenance management platform. The aim is to improve the sensitivity, scientificity, and coordination of irrigation district project operation and maintenance management, and to promote the modernization of irrigation district projects.

Keywords: smart water conservancy technology; irrigation district project; operation and maintenance management; application practice

引言

近几年来,数字孪生、人工智能、大数据等智慧技术体系日渐成熟,加快水利事业向数智化方向的迈进速度。智慧水利技术主要特征为深度感知、全方位互联、智能应用,为提升灌区工程运维管理水平提供有效支持,如构建空天地纵横感知网络,对灌区工程的水情、工情、农情进行全天候监测。再如,搭建智慧运维平台,使巡检、调度

等管理行为获得数字化升级,大幅提高管理实效性。可以看出,研究智慧水利技术在灌区工程运维管理中的应用实践策略具有重要意义。

1 构建智能化感知全面监测体系

1.1 水资源在线监测

为构建完善空天地水一体化感知网络,需做好水资源在线监测,核心监测数据包含水位、流量、雨量、土壤墒

情等。在实践中,要在渠道关键断面、分水口、量水堰等部位设置自记式水位计、声学多普勒流速剖面仪,持续收集水位、流速数据,结合水力关系模型对断面流量进行换算,确保配水流量动态变化取得精准记录。在降雨监测中,可在灌区上中下游设置翻斗式雨量站,实时回传分钟级雨强数据,为山洪预警、灌溉预降水位提供数据支持。在典型作物种植区域,要分层设置土壤水分传感器,同步监测土壤体积含水率、温度,结合地表土壤湿度,使点状墒情数据拓展为面域分布形态,精准掌握灌区工程土壤水分盈亏情况。为保障监测效果,各监测终端可利用低功耗广域网接入数据采集平台,构成全天候在线监测数据链,实现对灌区工程水帐的动态监管^[1]。

1.2 渠系与建筑物安全监测

需要对渗流、变形、裂缝等关键指标进行在线监测,及时捕捉异常信号。在灌区工程中,对于土石坝、渠堤、分水闸等建筑物,可在浸润线下埋设渗压计,形成断面渗压监测剖面,持续追踪渗流场变化,还要使用渗流量测量装置监控渗水量,及时发现渗流异常。在变形监测方面,可采用全球导航卫星系统高精度静态解算、测量机器人自动极坐标差分技术,对闸墩顶部、边坡关键点、渡槽支座实施三维位移监测,掌握结构沉降、倾斜、水平滑移数据。在裂缝监测中,可使用表面测缝计、分布式光纤传感技术,精确掌握已有裂缝开合变化,并利用光纤沿途应变感知能力,对堤坝、隧洞衬砌等结构的裂缝初生、拓展形成全面监测。此外,在灌区工程重要受力部位,还要安装钢筋计、混凝土应变计、土压力计,实时采集应力状态。在实际应用中,如果某项指标接近阈值,可自动触发报警,驱动巡查复核、深度评估,保障灌区工程中的渠系、建筑物获得全面安全管控^[2]。

1.3 机电设备状态监测与振动频谱分析

在灌区工程中,主要的动力核心机械设备包括泵站、闸门启闭机、水轮发电机组等。为利用智慧水利技术实现高效的灌区工程运维管理,应结合机械动力学,对各类设备的状态进行振动频谱分析。实际工作中,应在电动机轴承座、水泵叶轮端等关键部位设置加速度传感器,使多个方向的振动加速度信号获得同步采集,并对振动速度、位移、峭度等指标进行连续计算。与此同时,还可使用快速傅里叶变换将时域波形转换为频域波形,生成频谱特征图,之后将其与设备历史健康数据、典型故障特征数据库进行对比,可精准识别故障类型、劣化方向。例如,如果内圈通过频率的部位发生明显峰值,即可判断为轴承内圈

剥落,转频高次谐波、轴向振动的增加,则表示不对中。此外,还要将频谱振动分析与润滑油脂理化分析、机电电信号调节等技术互相结合,形成多层次的设备健康评估模型,使灌区工程的设备状态检修得到精准数据支持,实现预防性维护管理。

2 架构数字孪生底座实现数字融合

2.1 多源异构数据汇集与处理

灌区工程的运维管理数据涵盖水资源监测、工程安全监测、机电状态监测、气象水文预报、高分辨率遥感影像等,无论是格式、时间频率还是空间基准与数据质量,都存在较大差异。所以,应构建智慧水利数据融合平台,利用消息队列、物联网数据接入等方式,将关键数据进行采集入库,如水位时间序列、安全监测高频振动波形、非结构化巡检影像等^[3]。在数据清洗环节,可利用异常值检测算法,剔除数据野点,插补重建缺失数据。之后利用时间戳对齐、空间坐标统一转换,基于统一失控基准实现多源数据对齐。此外,还要遵循水利数据元数据标准,语义标注、分类存储数据实体,形成全域数据资源池,如基础地理数据、监测感知数据、业务管理数据等。

2.2 建立数据、模型融合框架

在数据层上,应建设数据、模型融合框架,包括水文产汇流模型、结构有限元分析模型、水位预测数据、需求回归分析等。应使用标准化服务接口、业务系统使模型活动交互。例如,水资源优化调度模型可对灌区工程实时监测数据、墒情预测结构进行灵活调用,计算完成后生成配水方案,业务系统内的调度模块会自动完成审核、执行、反馈。在执行过程中,还会产生引水、用水量等数据,其会回流至数据池,使模型参数获得在线自动校正。通过这种方式,可充分发挥数字空间中的分析计算能力,实现物理灌区的智能运行调控,避免模型计算、灌区工程运维管理互相分离。

2.3 灌区工程数字孪生场景

在数据、模型的支持下,要结合地理信息系统、建筑信息模型等可视化技术,构建灌区工程高保真数字孪生场景。在构建场景过程中,可将高精度数字正射影像、数字高程模型作为基础,融合渠系、闸站、渡槽、泵站等构筑物三维精细模型,结合动态纹理、颜色映射、数据标签等多元方式,直观呈现灌区工程的水流演进、水位起伏、闸门启闭角度等运行状态。如果灌区工程的水情发生变化,管理人员便可结合降雨预报,在孪生环境驱动水动力学模型,预演渠系水位变化、漫堤风险区域。再如,若某座水

闸的振动频谱发生异常,管理人员也可在三维场景内精准定位异常设备,调取历史监测曲线、缺陷记录,缩短从发现问题到解决问题的处理时间。

3 智能分析与辅助决策

3.1 径流预报与水资源优化

灌区工程可供水量会受到上游来水过程的影响,为提高运维管理效果,便要对水资源进行优化调度,所以应对径流的中短期进行精准预报。结合传统管理模式来看,使用产汇流模型会过于依赖下垫面参数、经验单元线,因此可使用长短期记忆神经网络等时序型深度学习模型,自动展现出降雨、径流序列之间存在的非线性映射关系,同时结合预报降水产品,可精准获得预见期范围内的概率径流过程。可以看出,融合深度学习径流预报、概念水文模型误差订正,可大幅提高预报精准性。此外,基于径流预报输入约束条件下,管理人员要综合考虑灌区工程的多个灌溉区域作物用水需求、渠道输水损失、水库调节库容,构建水资源多目标优化配置模型。模型建设目标应设置为灌溉效益最高、弃水与缺水风险最低,采用启发式优化算法设计水库蓄泄过程、分水口门开度方案。获得优化结果后,其会以调度表、过程线等形式自动呈现,管理人员还可灵活修正,实现径流预报、水资源的动态联动,确保灌区工程即便在丰枯交替条件下,也可提前制定水资源分配方案,增强调控主动性^[4]。

3.2 依据灌溉需水预测生成动态配水计划

在灌区工程运行过程中,尤其是在生育期内,灌溉需水具有动态变化的特点,可使用高时间分辨率遥感蒸散发反演、气象因子驱动曼-蒙特斯公式,结合土壤墒情完成实时监测,对不同作物的逐日、逐候需水强度进行精准预测。同时,管理人员还要基于作物水分响应函数,评估轻度水分亏缺对产量造成的影响,即便在有限水量环境下,也可精准识别灌溉优先顺序。管理人员还可将需水预测结果、渠系水流演进模拟互相结合,生成动态配水计划。计划会依据未来几天各渠段需水量时空差异,动态调整闸门开度、供水时序,实现按时、按需、按量供水。另外,在实践执行过程中,如实测墒情、雨量发生骤变,系统还可触发滚动修正功能,确保配水计划与实际情况始终处于同步状态,大幅提升灌区工程的水分利用效率、作物产量保障率。

3.3 设备故障诊断与维护

实践中,可构建深度卷积神经网络,在其中输入泵组振动频谱、温度、电流等时间序列,模型会自动学习故障

特征模式,实时分类设备状态,精准判断其是否发生异常、异常类型。此外,还可将退化趋势模型作为基础,如使用循环神经网络预测轴承剩余寿命,测算设备失效前的运行剩余时间。利用设备诊断、预测结果,管理人员可准确生成维护方案,比如在下次短期停机过程中更换某种零件,或是依据实际情况调整设备运行负荷,减缓劣化速度。管理人员还可衔接智能化设备诊断系统、灌区工程运维管理系统工单流程,形成全自动、全过程的闭环管理,从而大幅提高机电设备全生命周期的稳定性、经济性。

4 搭建智慧运维管理平台业务系统

4.1 智能巡检与移动运维系统

要积极建设智慧灌区工程运维管理平台,集成智能巡检系统,综合应用移动APP、机器人、无人机等多元技术,形成空、地、水的立体巡检模式^[5]。在实际工作过程中,巡检人员可使用移动终端设备,接收系统自动生成的巡检任务,逐项填写数据、上传现场照片、语音备注,系统还会自动记录巡检轨迹、时间戳,保障巡检过程得到全方位监督。对于风险较高的巡检区域,可利用搭载高清相机、热红外成像仪的无人机,对高陡边坡、坝体背水坡、大跨度渡槽进行快速扫描,智能识别表观裂缝、渗漏湿润区等异常状况。同时,使用水下巡检机器人,可对灌区工程的闸门槽、消力池水下部分进行淤积检测。机器收集影像数据后,会将其上传到后台系统,经计算机视觉模型运算后,精准识别缺陷部位、标注缺陷位置、确定严重程度、生成缺陷清单,完成后会将其推送给运维管理部门。通过这种方式,可让灌区工程的运维管理实现人机协同智能巡检,有效拓展巡检覆盖面、提高巡检频次,还可及早发现隐患,避免安全事故出现。

4.2 防汛抗旱应急响应调度指挥

结合灌区工程的实际运行情况来看,其常会处于暴雨洪水、旱涝急转区域。为提高灌区工程的智慧运维管理水平,应做好防汛抗旱的应急响应调度指挥。具体来说,可集成数字孪生场景、模型计算,使预案转化成数字预案链条。当智慧运维管理平台获取暴雨预警信号后,会自动开启应急流程,基于数字孪生场景精准模拟分洪、错峰调度方案内的洪水演进过程,之后对不同方案的削峰效果精准评估。同时,系统还可调取防汛物资、抢险队伍等数据库,对抢险资源调配路径进行优化,即刻推送到移动终端。在干旱应急响应环节,系统可依据水源蓄存状态、需水缺口预测数据,灵活调整抗旱应急水源启用顺序,使指挥工作决策更加科学,有效提高灾害处置的时效性。

4.3 运行调度与维保业务在线管理

在灌区工程的智慧运维管理平台使用中,可将运行调度、维保业务进行在线重组。运行调度方面,平台会依据配水计划生成闸门调节指令,经管理人员审核后,会下发到工程现场 PLC 控制柜,在场人员需手动确认并执行。执行后,水位、流量变化数据,会自动回传到平台中进行对比,形成闭环台账。在维保业务管理方面,其会基于资产台账,为灌区工程中的全部闸站、渠道建立数字资产档案,关联历史监测异常、巡检缺陷、维修记录等信息数据。如果智能分析模块发出故障预警,系统会自动生成维保工单,明确维修对象、问题描述、时限要求等。此外,在维修中,工作人员还要通过移动端完成数据留痕,如更换备件、加注润滑油等,维修完成后平台会自动在线校验数据,同步更新资产台账,促进灌区工程运维管理真正得到精细化、智能化发展。

5 结语

将智慧水利技术应用在灌区工程运维管理中,会将原本的分散管理模式升级为多元系统协同,形成智慧灌区运维管控体系。在该过程中,要积极打造智能感知体系,结合

数字技术,构建数字孪生计算场景。同时,智慧运维平台还会集成智能巡检、应急指挥、维保在线管理,实现全流程业务的智慧升级。未来,随着边缘计算、自演进模型、智能合约等技术不断成熟,灌区工程的运维管理工作水平将获得进一步提升,从而推动灌区工程获得智慧、可持续发展。

【参考文献】

- [1]文丹.智慧水利系统在水库建设中的创新应用[J].黑龙江水利科技,2026,54(4):147-149+153.
- [2]黄兰波,黄作文,郭活生,等.数字孪生水利从技术到生态重构的路径与实践[J].水利技术监督,2026(07):56-59+68.
- [3]秦秀霞.水利智能信息化技术在农业灌区节水灌溉工程中的应用[J].农业工程技术,2025,45(20):74-75.
- [4]李英.新发展理念下景电工程高质量发展实践路径[J].数字农业与智能农机,2024(3):72-75.
- [5]马青芳.面向高标准农田建设的老旧灌区水利工程优化改造研究[J].智能城市,2024,10(02):108-110.

作者简介:宁银军(1990.06—),男,汉族,本科,武汉大学,水利水电工程。童燃燃(1984.03—),男,汉族,本科,毕业院校:湖北工业大学,土木工程。